

УДК 621.314.

В. В. Замаруев<sup>1,2</sup>, О. В. Ильина, В. А. Макаров

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Кафедра «Промышленная и биомедицинская электроника», г. Харьков, Украина

## БАТАРЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены особенности батарейных систем накопления электрической энергии (БСНЭ). Указаны функции БСНЭ, диапазон рекомендуемой установленной мощности и энергоемкости систем в зависимости от точки их подключения. Приведены структурные схемы гибридных батарейных систем, которые могут применяться в диапазоне малых, средних и больших мощностей. Предложен метод управления гибридной системой накопления, обеспечивающий работу элементов БСНЭ с рекомендуемыми временами заряда-разряда. Библ. 30, рис. 7.

**Ключевые слова:** энергетическая система, накопитель энергии, аккумуляторная батарея, двухслойный конденсатор, согласующий преобразователь, прогнозное управление.

Розглянуто особливості батарейних систем накоплення електричної енергії (БСНЕ). Вказані функції БСНЕ, діапазон встановленої потужності та енергоемності систем, що рекомендується в залежності від точки їх підключення. Наведено структурні схеми гібридних батарейних систем, що можуть використовуватись в діапазоні малих, середніх та великих потужностей. Запропоновано метод управління гібридною системою накоплення, що забезпечує роботу елементів БСНЕ з часом заряду-розряду, що рекомендується. Бібл. 30, рис. 7.

**Ключові слова:** енергетична система, накопичувач енергії, акумуляторна батарея, двошаровий конденсатор, узгоджуючий перетворювач, прогнозне управління.

### Введение

Современные электроэнергетические системы характеризуются широким ассортиментом генерирующего оборудования. Традиционно их основу составляют базисные электростанции – ТЭС, ГЭС и АЭС, генерирующие основной объем потребляемой электрической энергии и обеспечивающие ее минимальную стоимость.

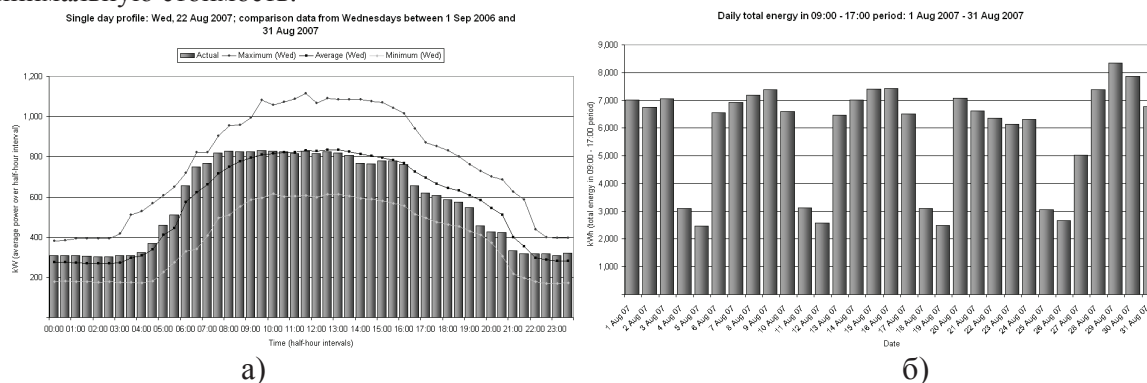


Рис. 1

Потребление энергии, с одной стороны, подчиняется периодическому закону [1] с колебаниями в течение дня (рис. 1, а) и недели (рис. 1, б) [1, 2], с другой – имеет стохастический характер [3].

Для удовлетворения пиковых потребностей в электроэнергии используются промежуточные и пиковые электростанции, имеющие существенно большую стоимость электроэнергии, но обеспечивающие заданную динамику ее генерирования. Повышение энерговооруженности конечных потребителей энергии, как в области промышленности, так и в бытовой сфере, расширение использования источников возобновляемой энергии, подключаемых, нередко, на уровне систем распределения электрической энергии, приводит к существенным колебаниям генерируемой и потребляемой электрической энергии, что требует применения устройств для балансировки энергетических сетей, выдачи электрической энергии «по требованию» [4, 5].

### Основной материал

Для решения этих проблем возможно использование химических, биологических, механических, тепловых, электрохимических и электрических технологий, каждая из которых имеет как преимущества, так и недостатки [6, 7]. Ограничимся рассмотрением использования батарейных систем накопления электрической энергии (БСНЭ) в состав которых могут входить как аккумуляторные батареи, так и различные типы конденсаторов. Установка БСНЭ, как накопителя и источника электрической энергии, целесообразна вблизи источников возобновляемой энергии, в системах передачи и распределения электрической энергии, предприятиях, офисах, коммерческих организациях, домах [8]. В зависимости от места установки БСНЭ существенно отличаются их энергоемкость – от 4.0..6.8 кВт ч для частных домов и небольших магазинов до 27..100 кВт ч для средних коммерческих организаций, офисов, предприятий и 1 МВт ч для солнечных и ветро-электростанций, систем передачи электрической энергии [9]. Требуемая мощность БСНЭ и их функции также могут существенно отличаться в зависимости от места установки. В зоне генерации энергии требуемая мощность БСНЭ составляет 1–10 МВт, основной функцией является сглаживание пульсаций мощности, генерируемой возобновляемыми источниками энергии. В системах передачи энергии БСНЭ мощностью 10–50 МВт обеспечивают поддержание частоты напряжения системы в заданном диапазоне. На этапе распределения электрической энергии БСНЭ обеспечивают компенсацию пикового потребления энергии, управление нагрузкой, стабилизацию напряжения системы. В местах потребления энергии, БСНЭ с мощностью 5-50 кВт управляют локальными потоками энергии, формируют экономически обоснованный временной график накопления и потребления энергии [10]. Рассмотренные функции БСНЭ могут быть определены как функции силовых активных фильтров, подавляющих воздействия с периодом следования от единиц и десятых секунд до десятков часов. Рабочий диапазон частот БСНЭ лежит ниже по частотной оси рабочего диапазона существующих силовых активных фильтров. К БСНЭ транспортных средств зачастую предъявляются специфические требования, определяемые как видом и целевым назначением транспортного средства, так и функциями БСНЭ [11, 12, 13].

В настоящее время, стандартным инструментом сравнения характеристик накопителей энергии стал де-факто график Рагони (Ragone chart) [14]. По вертикальной оси на этом графике откладывается удельная энергия накопителя ( $\text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$ ), по горизонтальной – удельная мощность ( $\text{Вт}/\text{кг}$ ), а диагональные линии соответствуют полному времени его разряда. Современные накопители, как правило, имеют симметричный заряд-разрядный цикл – время полного заряда накопителя и его разряда равны [5]. В соответствии с анализом накопителей электрической энергии, приведенным на рис. 2 [15], видно, что БСНЭ, основанная на каком-либо одном виде накопителя, будет обладать большей установленной емкостью, чем гибридная система, включающая два и более вида накопителей, при той же суммарной эксплуатационной емкости БСНЭ. Это определяется существенным отличием рекомендуемого времени разряда любого типа накопителя и временных

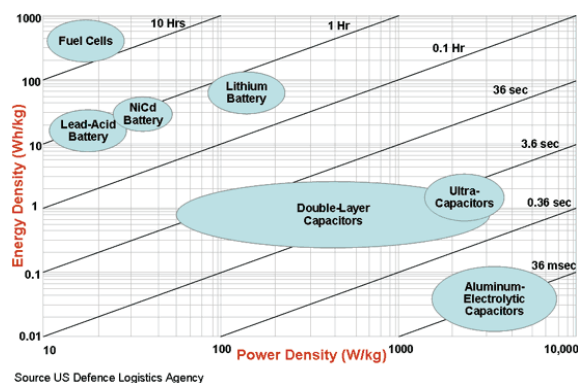


Рис. 2

характеристик компенсируемых воздействий, подобный вывод можно сделать и по данным,

приведенным в [16, 17]. Из-за отсутствия перекрытия временных показателей электрохимических накопителей электрической энергии – топливных элементов (fuel cells), литиевых аккумуляторов (lithium battery), двухслойных (double-layer capacitors), электролитических (aluminum electrolytic capacitors) и пленочных конденсаторов – целесообразно ввести в БСНЭ дополнительные виды

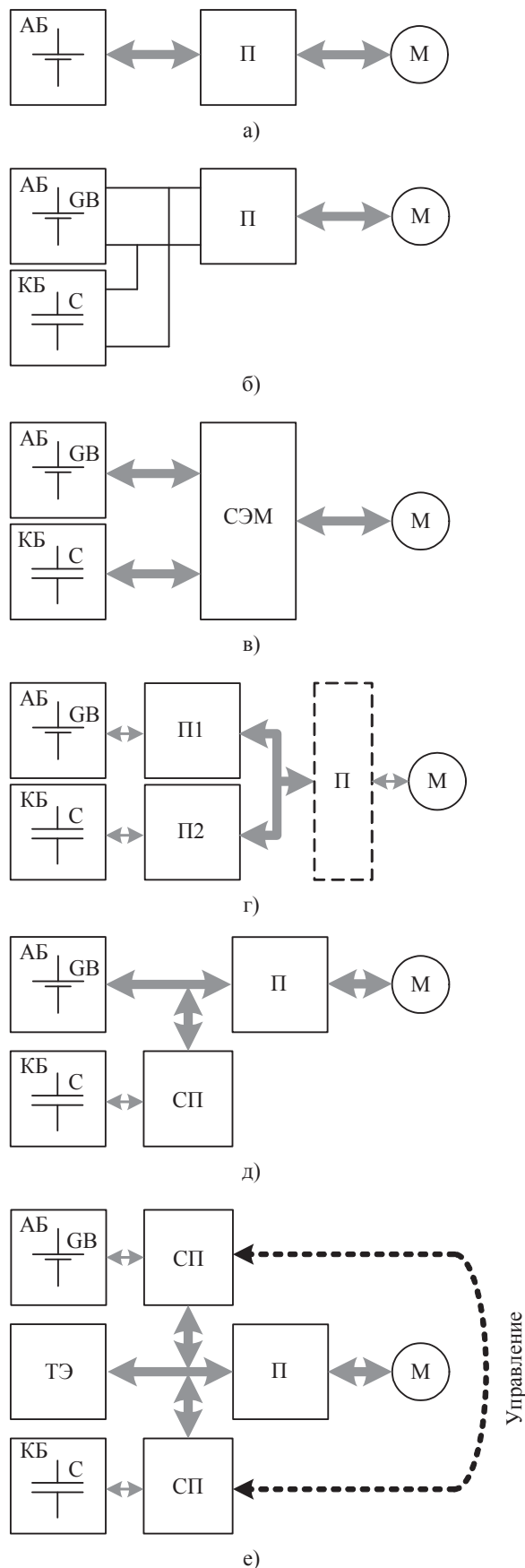


Рис. 3

накопителей. Для работы в интервале времени разряда накопителя от 1 до 200 с – дополнить БСНЭ системой супермаховиков (flywheel), а в интервале от 0,01 до 1 с – системой со сверхпроводящим накопителем энергии (Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES) [18].

Создание простейшей гибридной БСНЭ заключается в непосредственном параллельном подключении конденсаторной (КБ) и аккумуляторной батарей на стороне постоянного тока обратимого преобразователя (рис. 3, б). В этом случае распределение токов между составляющими частями БСНЭ определяется их характеристиками и не может быть изменено в процессе эксплуатации; АБ и КБ необходимо проектировать на полное напряжение звена постоянного тока (обычно 10-300 В).

Управление потоками энергии каждой из частей БСНЭ возможно при использовании системы энергоменеджмента (СЭМ) (рис. 3, в), которая, как правило, сводится к параллельному включению двух преобразователей П1 и П2 (рис. 3, г), работающих на общую нагрузку непосредственно либо через обратимый согласующий преобразователь П [22, 23]. Требование максимизации КПД системы приводит к необходимости сокращения количества преобразователей, установленных в цепи протекания тока БСНЭ (рис. 3, д). Согласующий преобразователь СП выполняет функции управления величиной и направлением потока энергии, передаваемого в конденсаторную батарею.

Одно из схемных решений согласующего преобразователя приведено на рис. 4; для улучшения частотных свойств БСНЭ используется батарея электролитических конденсаторов  $C_f$  относительно небольшой емкости [24].

Гибридная система накопления энергии должна проектироваться с учетом не только удельных показателей составляющих ее накопителей, но и требований со стороны пользователя и потребителя электрической энергии [19], что на современном уровне развития технологий исключает объединение принципиально разнородных накопителей в одном устройстве. Ядром гибридной системы является основной источник энергии, имеющий лучшие удельные энергетические показатели, в рассматриваемом классе – аккумуляторные батареи. Для коррекции характеристик основного источника энергии могут применяться вспомогательные источники – двухслойные и обычные конденсаторы. Выпуск литиевых аккумуляторов сосредоточен в Японии –

46 %, Южной Кореи – 27 % и Китая – 25 % [20]. В структуре рынка литиевых аккумуляторов Китая отсутствует направление производства и продажи аккумуляторов для использования в энергетической отрасли [21]. Предприятия США, в том числе производящие для внутреннего рынка мощные накопители энергии, поставляют на мировой рынок менее 1 % литиевых аккумуляторов. Таким образом, проектирование БСНЭ для энергетической отрасли может базироваться на существующих решениях из области электро- и гибридного транспорта.

Структурная схема транспортного средства с БСНЭ приведена на рис. 3, а. БСНЭ, включающая лишь аккумуляторную батарею АБ, подключена к тяговому двигателю М транспортного средства через обратимый согласующий преобразователь П.

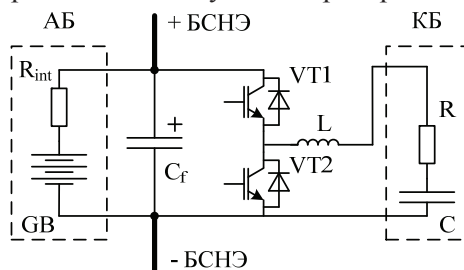


Рис. 4.

Из-за существенной разницы характеристик заряда-разряда основного и дополнительного накопителей каждый из них включается через индивидуальный согласующий преобразователь со скоординированным управлением (рис. 3, е) [25]. Последние три схемы рис. 3 по своей структуре совпадают с типовым применением силовых активных фильтров в сетях переменного тока (например [26]) с той разницей, что фильтрации подвергается линия постоянного тока.

В отличие от проектирования классических силовых активных фильтров, разработка БСНЭ для применения в энергетической отрасли требует не только информации о среднем потреблении энергии на обслуживаемом участке системы, но и знания статистических данных: среднего значения мощности, ее стандартного отклонения, минимального и максимального значений. Среднее и мгновенные значения мощности, текущая и минимальная степень заряда накопителя энергии существенно влияют на режимы работы и, следовательно, эксплуатационные характеристики элементов БСНЭ.

Использование непосредственного параллельного подключения конденсаторной и аккумуляторной батарей (рис. 3, б) в 2-4 раза менее эффективно с точки зрения уменьшения действующего тока АБ и степени ее разряда, чем при использовании управления каждым накопителем БСНЭ. Использование системы управления потоками энергии отдельных накопителей (рис. 3, д) позволяет достичь двукратного снижения действующего тока АБ в гибридной системе по сравнению с аккумуляторной БСНЭ [27].

По аналогии с БСНЭ, применяемыми в электротранспорте (рис. 3), можно разработать структурные схемы БСНЭ для применения в роли силовых активных фильтров в электроэнергетической отрасли. В системах электроснабжения единичных потребителей, не предъявляющих особых требований к качеству (в т. ч. бесперебойности) электроснабжения, и совместно с маломощными солнечными и ветрогенераторами может применяться БСНЭ со схемой, приведенной на рис. 5, а. Одним из приоритетных требований к подобным БСНЭ является малая стоимость. Повторное использование АБ электромобилей позволяет уменьшить стоимость всей системы одновременно со снижением ее эффективности. К достоинствам системы, приведенной на рис. 5, а, следует отнести малое количество используемых преобразователей электрической энергии, известные алгоритмы управления потоками энергии в накопителях. Недостатками являются малое напряжение АБ, невозможность построения каскадных схем, что ограничивает мощность БСНЭ величиной 5-50 кВт.

При мощностях БСНЭ в сотни киловатт сохраняется требование малой стоимости системы, но значительно возрастают требования по ее эффективности. Понятие эффективности БСНЭ включает как классический КПД так и стоимость владения системой, в том числе стоимость кВт электрической мощности и кВт·ч электроэнергии за время работы БСНЭ. Снизить стоимость можно при реализации оптимальных алгоритмов управления системой, учитывающих зарядные и разрядные токи (амплитудное и действующее значение), степень заряда накопителя и скорость ее изменения. Реализовать сложные законы управления как потоками энергии в звене постоянного тока – элементах БСНЭ, так и в звене переменного тока, можно в преобразователе со структурной схемой,



приведенной на рис. 5, б. Наличие единственного преобразователя постоянного напряжения в переменное упрощает и удешевляет систему.

Для БСНЭ с установленной мощностью более 1 МВт основным критерием выбора ее структуры является эффективность системы. Для повышения эффективности необходимо учитывать энергетические и частотные свойства каждого элемента БСНЭ (как накопителей, так и преобразователей). Использование дифференцированного подхода к проектированию БСНЭ привело к производству модульных систем, включающих только аккумуляторные или только конденсаторные батареи [5, 28, 29]. С учетом модульности, БСНЭ большой мощности могут подключаться к системе электроснабжения по схеме рис. 5, в, причем преобразователь каждого модуля часто выполняется двухзвенным (DC-DC, DC-AC).

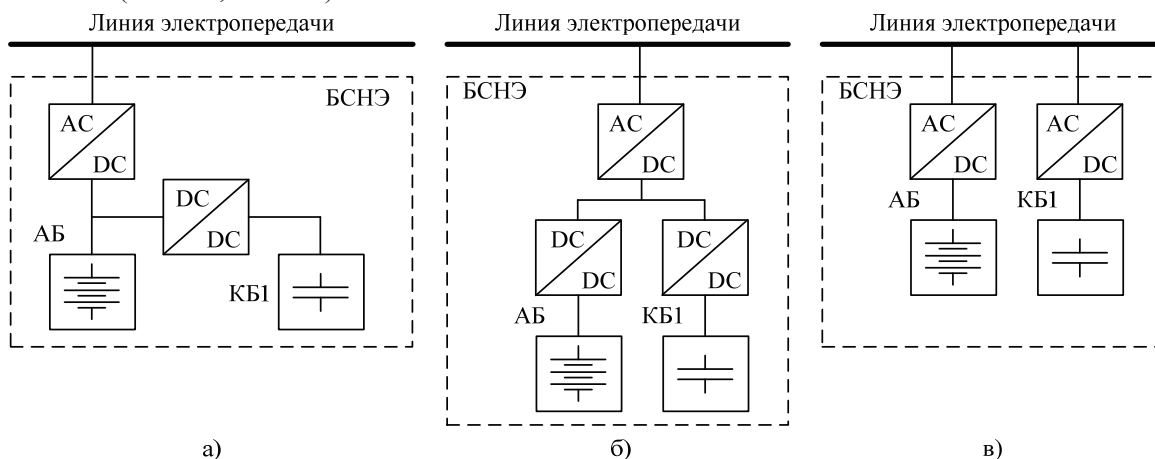


Рис. 5

Основными целями системы управления БСНЭ являются поддержание уровня заряда накопителей системы в заданных пределах и регулирование скорости заряда и разряда каждого из накопителей системы отдельно [27]. Ошибки в реализации алгоритмов управления могут привести к полной неработоспособности одного из модулей БСНЭ [22]. В [3] приведены данные по использованию статистических данных при планировании работы гетерогенной энергетической системы.

В ее основе лежит принцип прогнозирования потребления энергии на различных временных интервалах. Формируя прогноз потребления энергии на заданном интервале времени, который определяется свойствами самого медленного накопителя БСНЭ (1 час на рис. 6), устанавливают сигнал задания для этого накопителя.

Отклонения от установленного значения также могут быть спрогнозированы на меньших интервалах времени (5 мин. на рис. 6) и служат заданием более быстрому накопителю БСНЭ. Разница между прогнозируемым и реальным потреблением энергии отрабатывается наиболее быстрым каналом БСНЭ. Энергоемкость и установленная мощность составляющих БСНЭ определяется точностью прогнозирования нагрузки системы электроснабжения. Рассмотренный пример алгоритма

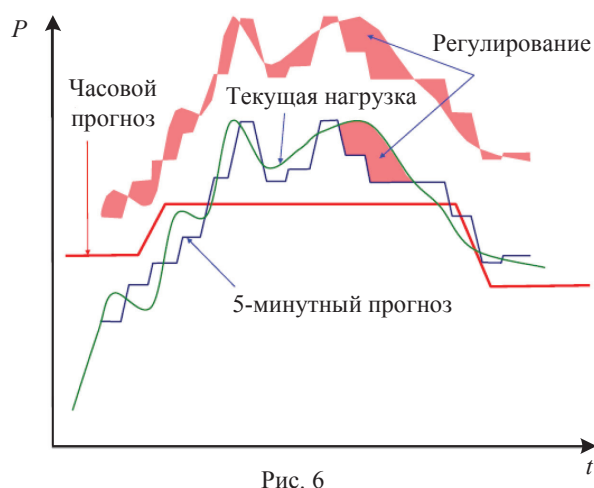


Рис. 6

управления предполагает использование трехканальной системы со структурой, приведенной на рис. 7, а. В базу знаний поступают данные мониторинга линии электропередачи, на основе которых формируются сигналы задания. Обратная связь, поступающая от накопителя энергии, позволяет оценивать степень его заряда, скорость заряда/разряда и в соответствии с этими данными корректировать задание.

Прогнозирование потребления энергии может проводиться как на основе статистической обработки данных на предыдущих интервалах времени, так и при помощи математических методов, оперирующих текущими данными.

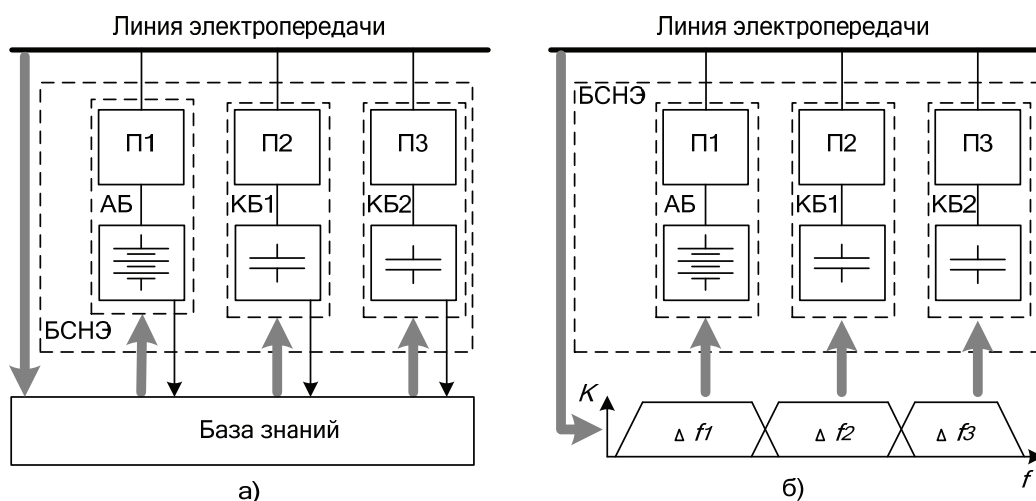


Рис. 7

Предполагая неизменность поведения системы на определенном интервале времени, можно использовать экстраполяцию данных, полученных, например, в результате преобразования Фурье мгновенной мощности, что позволит использовать частотное разделение сигналов для формирования задания отдельным модулям БСНЭ (рис. 7, б) [30].

#### Вывод

В статье рассмотрено применение батарейных систем накопления энергии в структурах систем электроснабжения различных типов. Показано, что для наиболее эффективного использования накопителей энергии в системе электроснабжения необходимо объединение нескольких типов накопителей с различными частотными свойствами и значениями энергетической емкости. Это требует разработки специальных схемных решений преобразователей БСНЭ, топология которых определяется структурой системы электроснабжения и функциями БСНЭ. Предложены варианты алгоритмов управления БСНЭ, имеющих модульную структуру, основанные на различных способах прогнозирования потребления электроэнергии.

#### Список литературы

1. Masters G. M. "Renewable and Efficient Electric Power Systems," Wiley-IEEE Press 2004 654 p.
2. "Energy Consumption Charts from Energy Monitoring Software," <http://www.energylens.com/outputs>
3. "Integration of Renewable Resources – Operational Requirements and Generation Fleet Capability At 20 % RPS," California ISO, 2010. <http://www.caiso.com/Documents/Integration-RenewableResources-OperationalRequirementsandGenerationFleetCapabilityAt20PercRPS.pdf>
4. Keyhani A., Marwali M. N., Dai M. "Integration of green and renewable energy in electric power systems," Wiley Press, 2010, 313 p.
5. "Battery Energy Storage Systems," AEG Power Solutions, 2013. [www.aegps.com/nc/en/smart-grids/battery-energy-storage/?download=BRO\\_Battery\\_Storage\\_EN.pdf&did=](http://www.aegps.com/nc/en/smart-grids/battery-energy-storage/?download=BRO_Battery_Storage_EN.pdf&did=)
6. Parfomak P. W. "Energy Storage for Power Grids and Electric Transportation: A Technology Assessment," Congressional Research Service Reports, 2012, 38 p. <http://www.fas.org/sgp/crs/misc/R42455.pdf>
7. Oberhofer A. "Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration," Global Energy Network Institute 2012 <http://www.ourenenergypolicy.org/wp-content/uploads/2012/09/Energy-Storage-Technologies.pdf>
8. "Energy Storage Systems," NEC Corporation, 2013. [http://www.nec.com/en/global/environment/energy/nec\\_aes/index.html](http://www.nec.com/en/global/environment/energy/nec_aes/index.html)
9. Smart Energy Storage Systems. Applications/ Panasonic Corporation, 2013. [http://panasonic.net/energy/storage\\_battery/applications/index.html](http://panasonic.net/energy/storage_battery/applications/index.html)
10. "ESS - Energy Storage Systems: new solutions for a new energy environment," Saft, 2012. [http://www.saftbatteries.com/force\\_download/ESS+MarketBrochure+en\\_0412\\_Protected.pdf](http://www.saftbatteries.com/force_download/ESS+MarketBrochure+en_0412_Protected.pdf)
11. MacCarley C. A. "A Review of Battery Exchange Technology for Refueling of Electric Vehicles," Proceedings of SAE Future Car Conference 2000. SAE Technical Paper 2000-01-1586, [http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1308&context=eeng\\_fac](http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1308&context=eeng_fac)

12. Pistoia G. "Battery Operated Devices and Systems. From Portable Electronics to Industrial Products," Elsevier, 2008, 408 p.
13. Ogasu M., Taguchi Y. "Development of contact-wire/battery hybrid LRV," *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2010)*, IEEE, 2010, pp. 1 – 6
14. Ragone, D. "Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles," SAE Technical Paper 680453, 1968.
15. Lawson B. "Battery Performance Characteristics - How to specify and test a battery," Woodbank Communications Ltd., 2005. <http://www.mpoweruk.com/performance.htm>
16. "UltraCap Double Layer Capacitors: A New Energy Storage Device for Peak Power Applications," EPCOS AG, 2001, 23 p. <http://www.angliac.com/epcos/literature/EPC690037600.pdf>
17. "Power to move," Nesscap Co., Ltd., 2012, 12 p. [http://www.nesscap.com/images/news/Nesscapcatalogue\\_2012.pdf](http://www.nesscap.com/images/news/Nesscapcatalogue_2012.pdf)
18. Martinez, J.A. "Modeling and characterization of energy storage devices," *Power and Energy Society General Meeting*, IEEE, 2011, pp. 1 – 6.
19. "Meeting the energy needs of future warriors," National Research Council (U.S.). Committee on Soldier Power/Energy Systems, National Academies Press, Aug 31, 2004, 113 p. [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=11065](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11065)
20. "Building the U.S. Battery Industry for Electric Drive Vehicles: Summary of a Symposium," National Academy of Sciences. National Academies Press, 2012, 246 p.
21. "China Li-ion battery market – GCIS China Strategic Research," <http://www.gcis.com.cn/china/Li-ion%27s%20Share%20of%20the%20Market.htm>
22. Giorgetti F., Pastena L., Tarantino A., Velotto F. "Energy saving by onboard storage," International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2006. 2006, pp. 481 – 483
23. Miller, J. M. "Energy storage technology markets and application's: ultracapacitors in combination with Lithium-ion," 7th International Conference on Power Electronics, 2007. ICPE '07. 2007, pp. 16 - 22
24. Ortuzar M., Moreno J., Dixon J. "Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, Issue: 4, 2007, pp. 2147 – 2156
25. Schupbach R. M., Balda J. C. The role of ultracapacitors in an energy storage unit for vehicle power management/ IEEE 58th Vehicular Technology Conference, VTC2003-Fall, Vol. 5, 2003, pp. 3236 – 3240
26. Jintakosonwitt P., Fujita H., Akagi H., Ogasawara S. "Implementation and performance of cooperative control of shunt active filters for harmonic damping throughout a power distribution system," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, Iss. 2, 2003, pp. 556 - 564
27. Miller J.M., Deshpande U., Dougherty T.J., Bohn T. "Power Electronic Enabled Active Hybrid Energy Storage System and its Economic Viability," Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. 2009, pp. 190 - 198
28. "A123's Grid Storage Solution (GSS)," A123 Systems, LLC. 2013 [http://info.a123systems.com/Portals/133376/content/brochures/a123%20brochure\\_grid%20storage%20solutions.pdf](http://info.a123systems.com/Portals/133376/content/brochures/a123%20brochure_grid%20storage%20solutions.pdf)
29. "Energy Storage with Super Caps for Capacities up to 26 MJ / 5 MVA," IDS AG 2008 [http://www.ids.ch/PDF/LF\\_IESC\\_08\\_08e.pdf](http://www.ids.ch/PDF/LF_IESC_08_08e.pdf)
30. Zamaruev V. "The use of the Dirichlet Kernel in the Control Systems of Active Filters for Industrial Power Line," Proceedings of the 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and nanotechnology (ELNANO). April, 16–19, 2013. Kiev. Ukraine. – P. 363–366.

## BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM FOR USE IN SMART POWER SYSTEMS

V. V. Zamaruev, O. V. Ilina, V. A. Makarov  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
The Department of Industrial and Biomedical Electronics,  
r. Kharkiv, Ukraine

*The main features of battery electric energy storage systems (BESS) are considered in this paper. The functions and the recommended range of installed capacity of BESS are specified depending on their point of connection to energy system. The topologies of a hybrid battery system, which may be used in a*

*range of small, medium and large capacity are given. Different control strategies for hybrid storage system that provide the recommend charge/discharge times of BESS elements are presented. References 30, figures 7.*

**Key words:** *power system, energy storage system, accumulator, double-layer capacitors, matching converter, predictive control.*